

カテーテルの変形挙動と強度に関する研究
 (引張りと振りの比例変形下で得られる降伏応力と変形速度の関係)

Study on Deformational Behavior and Strength for Catheter

(Relation between Yield Stress generated under Proportional Deformation for Tension and Torsion and the Rate of Deformation)

○松岡 明良¹, 加藤 保之²

Akira MATSUOKA¹, Yasuyuki KATO²

Abstract: The occurrence region of the yield stress generated in the catheter, which is made of soft nylon resin and reinforced with thin stainless wires, is described in this paper. Changing the ratio of tension and torsion variously, the occurrence region of yield stress generated during the process of proportional deformation when the rates of deformation are given with two types of speed is estimated. As for the determination method of the yield stress, a point where the stress relaxation curve based on the elastic mechanical model and the stress relaxation curve based on the plastic mechanical model intersect is adopted in this research.

1. 緒言

本研究の目的は、柔らかいナイロン樹脂の母材をステンレス製のブレードで補強したカテーテルを研究対象とし、その力学的特性を解明することである。

カテーテルを体内に挿入する際に生じる不安定現象の中でも、特に座屈に着目した研究が行われてきた。この初期の研究では、軸方向の圧縮変位の変形速度を種々に変えて座屈発生時の荷重を調べることで、座屈挙動と応力緩和現象の関係を明らかにしてきた。更に、実際の使用状況を考慮して、軸方向の圧縮変位のみが作用するだけでなく軸力と振りが同時に加わる複合荷重における座屈発生領域が調べられてきた。特にその中でも圧縮後に振りを加える過程では、カテーテルの断面形状がつぶれる扁平化現象が生じることが明らかとなり、異なる振り速度の下で扁平化の開始点の領域を調査してきた。しかし、これまで扁平化開始点以降の塑性域における扁平化現象の発達過程の詳細な調査が行われていなかった。

そこで本研究では、塑性域における扁平化現象の発達過程を解明していく前段階として、その基礎となる降伏現象について調査して行くことにする。

2. 力学モデルと降伏応力の決定方法

2-1 降伏応力の決定方法

本研究では、実験結果に基づき弾性ならびに塑性のそれぞれの応力緩和曲線を定式化し、2つの曲線が交差する点を降伏応力と推定する方法を採用することにする。図1は、引張りと振り(剪断)を同時に作用させた場合の主応力-主歪線図を模式的に表したものである。ここで、黒色の実線は、粘性が考慮された弾性の応力緩和曲線を、一方で、緑色の実線は同様に粘性が考慮された塑性の応力緩和曲線をそれぞれ表している。本研究では、この図の様に実験結果に基づきそれぞれの理論曲線を描き、両曲線の交わる図中の点Aを降伏応力と推定する。

2-2 塑性域内の力学モデルと応力緩和曲線

図2は、塑性域内のカテーテルの力学モデルを表している。本研究では、全歪増分を Maxwell 要素を含む弾性

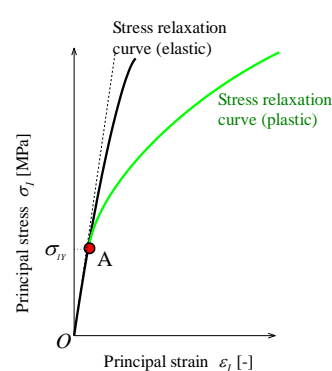


Fig.1 Determination method for yield stress

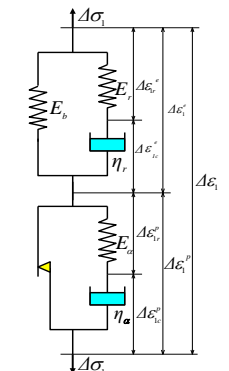


Fig.2 Mechanical model

成分と塑性成分に分解したモデルを採用することにする(ただし、この図は、主応力と主歪の状態で表している)。

ここで、この力学モデルの微分方程式は、

$$\frac{d\Delta\sigma_i}{dt} + \frac{1}{T_r} \Delta\sigma_i = \frac{1}{1+h} \left[(E_r + E_b) \frac{d\Delta\epsilon_i}{dt} + \frac{E_b}{T_r} \Delta\epsilon_i \right] \quad (1)$$

と表される。ただし、 E_b は、自然時間に寄与しない弾性係数を、 E_r は、時間と共に緩和減衰して行く弾性係数を、また、 T_r は、緩和時間をそれぞれ表している。なお、図2中の η_r は、粘性係数であり $\eta_r = T_r E_r$ の関係で表される(これらの係数は、実験より決定することができる)。また、 h は、歪硬化係数であり、応力空間内のそれぞれの方位の主応力-主歪線図を描き、実験値に基づき決定できる。

次に、式(1)の微分方程式の解を求めると、

$$\Delta\sigma_i = \frac{1}{1+h} \left\{ E_b + \frac{E_r T_r}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_r}} \right) \right\} a_i \Delta t = \frac{1}{1+h} E^* \Delta\epsilon_i \quad (2)$$

となる。但し、上式中の $\Delta\epsilon_i$ は、歪増分であり以下のように表される。

$$\Delta\epsilon_i = a_i \Delta t = (\epsilon_{i,max} / t_{max}) \Delta t \quad (3)$$

なお、弾性域内の力学モデルについては、図2の弾性歪増分、すなわち、上部の3要素モデルのみで表され、その力学モデルの微分方程式ならびに解は、式(1)と式(2)の歪硬化係数 h の値を0に置き換えた結果に帰着する。

1: 日大理工・学部・機械, 2: 日大理工・教員・機械

3. 実験装置ならびにカテーテルの断面形状と試験片の寸法

引張と振りを同時に加えるために、本実験では、島津卓上試験機（オートグラフ AGS-J）に振り試験機を装着して使用する。また、本研究のカテーテルは、ナイロン樹脂からなる母材（外径 $D_o=1.37$ [mm]、内径 $D_i=1.07$ [mm]）にブレード（ステンレス製のワイヤー：外径 $d_o=0.0508$ [mm]、初期織り込み角 $\theta_0=45$ [deg.]）が管状に織り込まれた構造である。このブレードは左右 16 本ずつ合計 32 本から構成されている。なお、ブレードの織り込み角 θ_b は全て 45[deg.]、また、試験片の標点間距離 L_o は 120 [mm] である。

4. 実験装置ならびに実験方法について

本実験は、2章で説明した緩和曲線内の係数の値を決定するために弾性域内で行う実験と、降伏応力を決定するために塑性域内で行う実験の 2 通りで構成されている。

4-1 弾性域における実験条件

軸方向変位速度と振れ速度の比率を変えて歪主軸の方位 θ を 6 通りの異なる方向（45, 50, 60, 70, 80, 90 [deg.]）に固定して実験を行う。速い速度の実験結果から主応力-主歪線図を描き、その接線係数を求めることで各方位の弾性係数が決定される。一方で、前述の E_r と E_b を決定するために、一定歪速度で軸方向変位と振れ角を 4[sec] 与え、その後それらの軸方向変位と振れ角を 300[sec] 間固定する条件で、一段階のステップ歪下の応力緩和の実験を行う。

4-2 塑性域における実験条件

弾性実験の場合と同様に軸方向変位速度と振れ速度の比率を変えることで歪主軸の方位 θ を 6 通りの異なる方向（45, 50, 60, 70, 80, 90 [deg.]）に固定し、2段階の変形速度（速度比 5 倍）で実験を行い、降伏応力を調査する。なお、実験条件の詳細は、紙面の都合上省略する。

5. 実験結果

5-1 弾性域における実験

図 3 に、歪主軸とブレードの相対角度 $\phi (= \theta - \theta_b)$ と弾性係数の関係を、図 4 に、 E_r と E_b を決定するために行なった一段階のステップ歪下の応力緩和の実験の結果を示す。図中の各方位の E_r と E_b の比率、ならびに緩和時間 T_r を求め、粘性係数 η_r を求めた結果を図 5 に示す。

5-2 塑性域における実験

図 6 は、歪主軸の方位が $\theta=45$ [deg.]、すなわち、剪断のみの応力と歪の関係を表したものである。図 7 は、引張と剪断が同時に効く複合荷重の一例として、 $\theta=80$ [deg.] の結果を表している（なお、これらの図は、主応力と主歪の関係である）。図中の青色のプロット \circ が変形速度の速い条件、紫色のプロット \circ が変形速度の遅い条件の実験結果をそれぞれ表している。また、黒と赤色の実線は、速い条件と遅い条件の粘性が考慮された弾性の応力緩和曲線を、また、緑と橙色の実線は塑性の応力緩和曲線を表している。これらの曲線の交わったプロット（ \bullet 、 \bullet ）が推定された降伏応力である。

図 8 は、これらの実験結果に基づき、応力空間に降伏現象の発生領域を表したものである。この図から、引張側に比べ剪断側で降伏領域が大きくなっていることが確

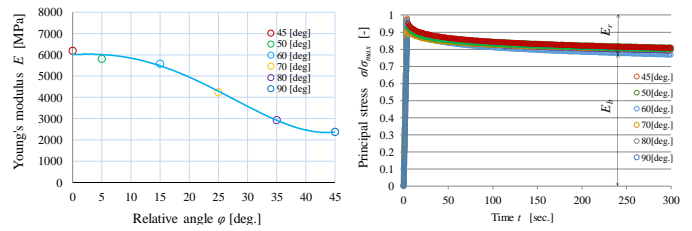


Fig.3 Young's modulus

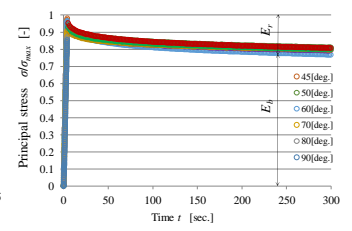


Fig.4 Relaxation tests

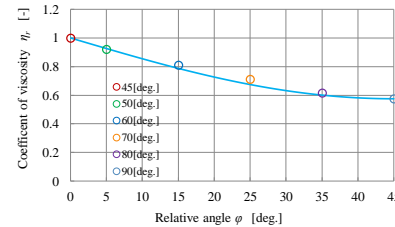


Fig.5 Coefficient of viscosity

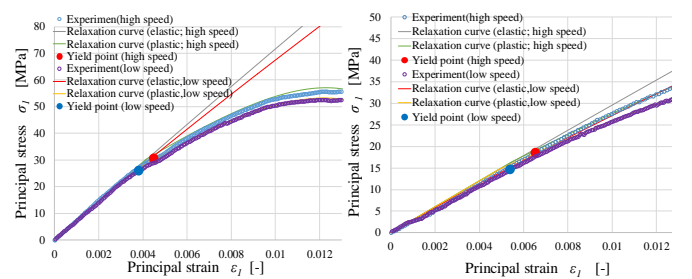


Fig.6 Deviatoric stress-strain (45 [deg.])

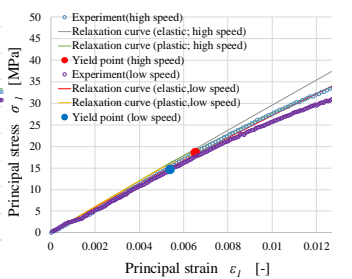


Fig.7 Deviatoric stress-strain (80 [deg.])

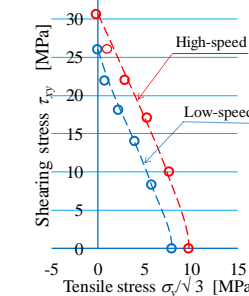


Fig.8 Region of yield stress

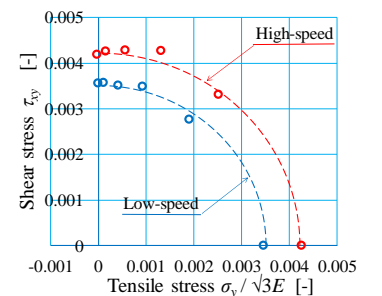


Fig.9 Region of yield stress (dimensionless representation)

認できる。これは、ブレードの角度が $\theta_b=45$ [deg.] であり、ブレードの補強効果が表れているためであると考えられる。また、赤色で表した変形速度が速い場合の領域は、青色で表した遅い場合の領域に比べて広いことが確認できる。図 8 の結果を各方位の弾性係数で除して無次元化して表したものが図 9 である。速い場合と遅い場合の領域がほぼ円形となっていることから、応力空間の方向に関わらず、同じ主歪値で降伏現象が始まると考えられる。

6. 結言

本研究では変形速度を 2 段階に変えて、軸力と振りの複合荷重下での降伏現象の発生領域を調査した。その結果、引張側に比べ剪断側で降伏領域が大きくなり、また、変形速度が速い場合には、遅い場合に比べ領域が広いことが確認できた。更に、降伏応力を各方位の弾性係数で除して無次元化した結果、ほぼ円形となり、応力空間の方向に関わらず、主歪値が同一値に達すると降伏現象が始まることが明らかとなった。